

Recuperação de solos degradados por mineração de carvão: indicadores de qualidade e espécies vegetais

Lizete Stumpf¹, Marília Alves Brito Pinto², Eloy Antonio Pauletto²,
Luiz Fernando Spinelli Pinto², Leonir Aldrighi Dutra Junior²

¹ Universidade Federal do Rio Grande, Campus São Lourenço do Sul, Rua Marechal Floriano Peixoto, 2236, Centro, CEP 96170-000, São Lourenço do Sul-RS, Brasil. E-mail: zete.stumpf@gmail.com

² Universidade Federal de Pelotas, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Departamento de Solos, Campus Universitário, Centro, CEP 96001-970, Pelotas-RS, Brasil. Caixa Postal 354. E-mail: ma.agro@gmail.com; pauletto_sul@yahoo.com.br; lfspin@uol.com.br; leonirdutrajr@gmail.com

RESUMO

O objetivo do trabalho foi avaliar a resistência tênsil e o carbono das frações leve livre e leve oclusa dos agregados de um solo construído após mineração de carvão e os atributos radiculares das gramíneas utilizadas na revegetação. O estudo foi realizado em uma área de mineração de carvão e as espécies vegetais analisadas foram a *Urochloa humidicola*, o *Panicum maximum* e a *Urochloa brizantha*. Em julho de 2012 foram coletadas 48 amostras de solo para a determinação do pH em água, da saturação por bases e alumínio, do teor de carbono orgânico total, do carbono das frações leve livre e leve oclusa dos agregados e da resistência tênsil de agregados. Foram coletados 12 monólitos de solo para determinação da densidade, volume, comprimento e diâmetro médio radicular das espécies. A resistência tênsil de agregados pode ser considerada um indicador da qualidade de solos minerados em processo de recuperação, pois a maior concentração de raízes das gramíneas na camada superficial pode estar influenciando na sua reestruturação física. Os teores de carbono da fração leve livre e leve oclusa não se mostraram indicadores adequados para avaliar a recuperação de áreas degradadas pela mineração de carvão em face das correlações negativas com os atributos radiculares, devido ao carbono presente no horizonte B do solo original e nos estereis.

Palavras-chave: fração leve livre, fração leve oclusa, resistência tênsil, solos construídos

Recovery of degraded soils by coal mining: quality indicators and plant species

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the tensile strength and carbon contents in the free light and occluded light fraction of the aggregates in a constructed soil after coal mining and root attributes of grasses used for revegetation. The study was carried out in a coal mining area and plant species evaluated were the *Urochloa humidicola*, the *Panicum maximum* and the *Urochloa brizantha*. In July 2012, 48 soil samples were collected to determine pH in water, base and aluminum saturation, total organic carbon, carbon contents in the free light and occluded fractions of aggregates and tensile strength of the aggregates. Twelve soil monoliths were collected to determine the root density, volume, length and mean diameter of the studied species. The tensile strength of aggregates can be considered an indicator of the quality of mined soils recovery, since the highest concentration of the grass roots in the surface layer may be influencing the physical structure. The levels of free light and occluded carbon fractions were not appropriate indicators to assess the recovery of degraded areas by coal mining due to negative correlations with root attributes because of the carbon present in the B horizon of the original soil and from the overburden.

Key words: free light fraction, occluded light fraction, tensile strength, mine soils

Introdução

A mineração a céu aberto causa sérios danos ao ambiente, pois provoca a remoção da cobertura vegetal e dos horizontes do solo (Mukhopadhyay et al., 2013), acarretando em perdas de carbono, devido à mistura mecânica das camadas (Maharana & Patel, 2013; Ussiri et al., 2006), e em compactação da área recomposta topograficamente (Sheoran et al., 2010; Stumpf et al., 2014). Por conta disso, o uso de espécies vegetais tem sido utilizado como estratégia na recuperação dos solos minerados em diversos países, como China (Zhang et al., 2015), República Checa e Alemanha (Sourkova et al., 2005), Estados Unidos (Sena et al., 2014); Índia (Mukhopadhyay et al., 2014), Cuba (Izquierdo et al., 2005) e Brasil (Stumpf et al., 2014).

Uma vez iniciado o processo de recuperação nas áreas mineradas, há necessidade de avaliações dos atributos do solo, para acompanhar as melhorias do novo sistema (Yada et al., 2015), e assim, estimar a resiliência de solos drasticamente impactados pela mineração.

Estudos prévios, em áreas agrícolas e mineradas, mostram que determinadas espécies vegetais são mais eficientes na recuperação dos atributos físicos e químicos do solo (Lima et al., 2012; Debiasi et al., 2008; Lunardi Neto et al., 2008). Dentre os estudos recentes em áreas agrícolas, Lima et al. (2012) reportaram um período de oito anos para que a estrutura de um Latossolo degradado fosse melhorada pelo uso do *Cynodon* spp. Por outro lado, Debiasi et al. (2008) observaram redução no grau de compactação em um Argissolo após quatro anos de cultivo de *Avena sativa* e *Raphanus sativus*. Em áreas degradadas por mineração, Lunardi Neto et al. (2008) observaram que a adubação orgânica, associada ao uso de *Urochloa brizantha*, favoreceu a recuperação da qualidade física de um solo construído em Santa Catarina, após 4 anos de revegetação. Similarmente, Rodrigues et al. (2007) observaram que o plantio de *Urochloa brizantha*, associado com a regeneração natural após 10 anos de revegetação, promoveu melhorias de um solo degradado no cerrado.

Os atributos físico-químicos mais comumente abordados na avaliação de solos minerados em processo de recuperação são a granulometria, densidade do solo, distribuição de poros, distribuição de agregados estáveis em água, diâmetro médio ponderado dos agregados, pH e teor de carbono orgânico total (Zhang et al., 2015; Stumpf et al., 2014; Maharana & Patel, 2013; Wick et al., 2009; Ussiri et al., 2006). Por sua vez, não é comum nas avaliações da qualidade de solos minerados determinações da resistência tênsil, do teor de carbono da fração leve livre e oclusa de agregados, embora estes atributos sejam muito utilizados como indicadores da qualidade físico-química de solos agrícolas (Abdollahi et al., 2014; Santos et al., 2013; Pillon et al. 2011; Ferreira et al., 2011; Bavoiso et al. 2010; Frazão et al., 2010; Abid & Lal, 2009; Portugal et al., 2008; Tormena et al., 2008; Ibarra et al., 2005; Roscoe & Buurman, 2003; Imhoff et al., 2002).

A resistência tênsil (RT) se refere a energia necessária para quebrar os agregados em partes menores, podendo refletir a capacidade das raízes das plantas em penetrar no solo (Ibarra et al., 2005). O carbono da fração leve livre (C-FLL) representa a matéria orgânica externa aos macroagregados estáveis, como

resíduos vegetais parcialmente decompostos, enquanto que a fração leve oclusa (C-FLO) representa a matéria orgânica protegida no interior dos macro e microagregados (Pillon et al., 2002).

Embora os atributos RT, C-FLL e C-FLO sejam reconhecidos indicadores de qualidade de solos agrícolas, não há pesquisas que os abordem como indicadores da recuperação de solos minerados. Portanto, o objetivo do trabalho foi avaliar a resistência tênsil e o carbono das frações leve livre e leve oclusa dos agregados de um solo construído após a mineração de carvão e os atributos radiculares das gramíneas utilizadas na revegetação.

Material e Métodos

O estudo foi realizado em uma área de mineração de carvão, sob concessão da Companhia Riograndense de Mineração (CRM), localizada em Candiota/RS com as seguintes coordenadas geográficas: 31° 33' 56" S e 53° 43' 30" W.

As principais etapas envolvidas no processo de extração do carvão a céu aberto e a posterior recomposição topográfica da área minerada abrangem a remoção dos horizontes A, B e/ou C do solo original e das rochas, seguido da extração dos bancos de carvão. Na cava aberta para a extração do minério, depositam-se os estéreis (mistura de rochas e carvão não aproveitados), que são aplainados por tratores de esteira durante a recomposição topográfica da área, e que recebem, posteriormente, uma camada de solo (horizonte A e/ou B), retirada anteriormente à lavra do carvão, originando assim o “solo construído”.

O solo da área em estudo foi construído no início de 2003 e sobre os rejeitos foi reposta uma camada superficial de solo com predomínio do horizonte B de um Argissolo Vermelho eutrófico típico, de classe textural argilosa (Tabela 1).

Antes da instalação do experimento, em face da área se encontrar extremamente compactada devido a grande circulação de máquinas durante a construção do solo (caminhões carregados com aproximadamente 20 Mg de terra vegetal e tratores de esteira metálica do modelo D8T da Caterpillar® com peso de 38 Mg, potência de 259 kW, comprimento e largura da esteira sobre o solo de 3,20 e 0,56 m, respectivamente, e área de contato das esteiras com o solo de 3,6 m²), o solo construído foi escarificado com patola a uma profundidade aproximada de 0,15 m, seguido por calagem correspondente a 10,4 Mg ha⁻¹ de calcário com PRNT de 100 % e adubação com 900 kg ha⁻¹ de NPK na fórmula 5-20-20, com base em resultados obtidos pela análise de solo.

O experimento foi instalado entre setembro/outubro de 2007 em parcelas de 20 m², em delineamento de blocos ao acaso, com quatro repetições. As espécies vegetais analisadas neste estudo foram a *Urochloa humidicola*, o *Panicum maximum* e a *Urochloa brizantha*.

Tabela 1. Granulometria nas camadas de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30m do solo construído

Camada (m)	Areia	Silte (g kg ⁻¹)	Argila	Classe textural
0,00-0,10	336	211	453	Argilosa
0,10-0,20	318	204	478	Argilosa
0,20-0,30	259	274	467	Argilosa

Em julho de 2012 foram coletadas 48 amostras com estrutura não preservada (4 blocos x 4 tratamentos x 1 repetição por parcela x 3 camadas) para a determinação do pH em água e da saturação por bases e alumínio, seguindo metodologia da Embrapa (2011), do teor de carbono orgânico total, seguindo metodologia de Tedesco et al. (1995), do teor de carbono da fração leve livre e leve oclusa dos agregados, seguindo metodologia de Conceição et al. (2008), e da resistência tênsil de agregados, seguindo metodologia de Imhoff et al. (2002).

Para a determinação do teor de carbono da fração leve livre e leve oclusa dos agregados foram utilizados 144 agregados (4 blocos x 3 tratamentos x 4 agregados x 3 camadas) e para a determinação da RT dos agregados foram utilizados 1080 agregados (4 blocos x 3 tratamentos x 30 agregados x 3 camadas) que foram classificados com auxílio de peneiras metálicas de 19,0 e 12,5 mm de abertura, com diâmetro médio de 15,75 mm. Cada agregado foi pesado individualmente e submetido a teste de tensão indireta para determinação da RT, utilizando um atuador eletrônico linear Modelo MA933.

Adicionalmente, foram coletadas amostras de raízes através do método do monólito (Böhm, 1979), com o auxílio de placas com pregos (0,40 m de comprimento x 0,30 m de altura x 0,035 m de largura), totalizando 12 placas de pregos (4 repetições por tratamento). Após lavagem e separação por camadas, as raízes foram cortadas e digitalizadas em scanner HP Scanjet 3570C para determinação de volume, de comprimento e de diâmetro radicular, através do Software SAFIRA. Após o escaneamento, as raízes foram secas em estufa a 65°C por um período de 72 h, para obtenção da massa seca de raízes. Pela relação dos valores de massa seca de raízes e o volume de solo que estas ocupavam, obteve-se a densidade radicular de cada camada avaliada. Em todos os monólitos coletados, fez-se a medição da espessura da camada de solo, conforme mostrado na Tabela 2.

Para análise dos dados químicos e físico do solo e das raízes da planta, no intuito de verificar a relação entre eles, agrupá-los e posteriormente verificar a relação dos grupos de variáveis com cada espécie de gramínea, foi aplicada a análise de componentes principais (ACP) que segundo Ferreira (2008) é uma técnica multivariada de modelagem da estrutura de covariância, cujo objetivo é buscar variáveis latentes que representam combinações lineares de um grupo de variáveis sob estudo que são, por sua vez, relacionadas. As análises foram realizadas por meio do software estatístico SAS (Statistical Analysis System, 1985).

Tabela 2. Espessura da camada de solo presente nos diferentes blocos e tratamentos do solo construído em Candiota, até a profundidade de 0,30 m

Espessura	Bloco	Tratamentos		
		<i>U. humidicola</i>	<i>P. maximum</i>	<i>U. brizantha</i>
Camada de solo	I	0,20 m	0,26m	0,30 m
Camada de estéril		0,10 m	0,04 m	Ausente
Camada de solo	II	0,24 m	0,24 m	0,20 m
Camada de estéril		0,06 m	0,06 m	0,10 m
Camada de solo	III	0,30 m	0,30 m	0,30 m
Camada de estéril		Ausente	Ausente	Ausente
Camada de solo	IV	0,24 m	0,25 m	0,04 m
Camada de estéril		0,06 m	0,05 m	0,26 m

Resultados e Discussão

Os valores médios de densidade (DR), volume (VR) e comprimento radicular (CR) mostram uma maior concentração do sistema radicular de todos os tratamentos na camada de 0,00-0,10 m, decrescendo até a profundidade de 0,30 m. Por outro lado, o diâmetro médio radicular (DMR) manteve-se semelhante entre as camadas (Tabela 3).

Em relação aos atributos físico-químicos, se observa que os valores médios de RT foram menores na camada de 0,00-0,10 m em relação às camadas subjacentes, enquanto que, de maneira geral, os valores de carbono orgânico (CO) foram semelhantes entre as camadas (Tabela 4).

Por outro lado, os valores médios de C-FLL e C-FLO foram variáveis entre os tratamentos. A *U. humidicola* apresentou valores muito superiores de C-FLL na camada de 0,20-0,30 m em relação às camadas superiores, enquanto que o *P. maximum* apresentou valores semelhantes nas camadas de 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m e superiores à camada de 0,00-0,10 m. Por fim, a *U. brizantha* apresentou valores superiores de C-FLL na camada de 0,10-0,20 m em relação à camada de 0,20-0,30 m e à camada de 0,00-0,10 m conforme se observa na Tabela 4.

Em relação ao C-FLO se observa que a *U. humidicola* apresentou maior valor na camada de 0,00-0,10 m, seguido da camada de 0,20-0,30m, enquanto que o *P. maximum* apresentou maior valor na camada de 0,20-0,30 m, seguido da camada de 0,00-0,10 m. Entretanto, a *U. brizantha* apresentou maior valor na camada de 0,10-0,20 m, seguido da camada de 0,00-0,10 m (Tabela 4).

Observa-se na Tabela 5 que os valores médios de pH foram superiores a 6,0 na camada de 0,00-0,10 m, aumentando o grau de acidez do solo nas camadas subjacentes. Consequentemente,

Tabela 3. Momentos estatísticos para densidade radicular (DR), volume radicular (VR), comprimento radicular (CR) e diâmetro médio radicular (DMR) para tratamentos com gramíneas perenes

Tratamento	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med
	DR (kg m ⁻³)			VR (m ³ m ⁻³)			CR (m m ⁻³)			DMR (mm)		
Camada de 0,00-0,10 m												
<i>U. humidicola</i>	3,71	8,07	5,96	0,011	0,026	0,018	24579	89071	56511	0,29	0,33	0,30
<i>P. maximum</i>	1,96	6,99	3,89	0,004	0,017	0,009	20561	65993	41622	0,29	0,30	0,29
<i>U. brizantha</i>	8,42	12,70	10,43	0,023	0,029	0,025	36825	54890	43451	0,31	0,37	0,34
Camada de 0,10-0,20 m												
<i>U. humidicola</i>	1,32	3,23	2,56	0,004	0,014	0,009	12478	34028	23463	0,30	0,33	0,31
<i>P. maximum</i>	1,21	1,51	1,39	0,003	0,004	0,003	15624	21449	18329	0,29	0,30	0,29
<i>U. brizantha</i>	1,14	2,97	1,73	0,003	0,006	0,004	6804	9063	8357	0,32	0,36	0,35
Camada de 0,20-0,30 m												
<i>U. humidicola</i>	0,16	0,81	0,51	0,001	0,002	0,002	4043	7818	5750	0,30	0,35	0,32
<i>P. maximum</i>	0,29	0,83	0,57	0,001	0,003	0,001	3323	22481	9523	0,28	0,29	0,29
<i>U. brizantha</i>	0,44	1,24	0,75	0,002	0,003	0,002	2744	8488	5424	0,28	0,50	0,38

Tabela 4. Momentos estatísticos para resistência tênsil de agregados (RT), teor de carbono orgânico (CO) e carbono da fração leve livre (C-FLL) e leve oclusa (C-FLO) dos agregados de um solo construído sob cultivo de gramíneas perenes

Tratamento	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med
	RT (kPa)			CO (g kg ⁻¹)			C-FLL (g kg ⁻¹)			C-FLO (g kg ⁻¹)		
Camada de 0,00-0,10 m												
<i>U. humidicola</i>	62,89	105,75	82,18	6,08	8,54	7,92	0,23	0,90	0,53	0,35	2,75	1,76
<i>P. maximum</i>	74,25	183,20	136,39	4,84	9,80	8,12	0,30	1,38	0,79	0,40	4,28	1,71
<i>U. brizantha</i>	86,95	122,65	110,63	9,07	13,92	11,06	0,07	0,22	0,15	0,37	0,97	0,67
Camada de 0,10-0,20 m												
<i>U. humidicola</i>	139,24	208,67	163,86	3,88	7,93	5,08	0,11	0,25	0,18	0,20	0,41	0,33
<i>P. maximum</i>	114,39	205,37	172,57	3,84	5,84	4,76	0,19	6,54	1,83	0,24	4,98	1,50
<i>U. brizantha</i>	89,25	273,30	144,77	4,08	15,12	7,18	0,19	17,98	4,83	0,17	1,48	0,80
Camada de 0,20-0,30 m												
<i>U. humidicola</i>	143,01	189,46	159,72	3,24	9,52	6,40	0,01	15,67	4,43	0,18	4,63	1,46
<i>P. maximum</i>	114,49	201,16	146,80	3,88	9,12	6,10	0,19	4,06	1,50	0,22	10,60	3,71
<i>U. brizantha</i>	86,08	221,97	152,42	3,70	15,96	7,83	0,20	7,72	3,34	0,10	0,64	0,37

Tabela 5. Momentos estatísticos para o pH, a saturação por bases (V) e por alumínio (m) de um solo construído sob cultivo de gramíneas perenes

Tratamento	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med
	pH			V (%)			m (%)		
Camada de 0,00-0,10 m									
<i>U. humidicola</i>	5,44	6,93	6,07	79,82	88,64	80,50	0,26	1,11	0,56
<i>P. maximum</i>	6,00	6,87	6,44	82,25	88,64	84,53	0,70	2,66	1,22
<i>U. brizantha</i>	5,40	7,42	6,60	82,94	95,62	88,90	0,22	0,69	0,37
Camada de 0,10-0,20 m									
<i>U. humidicola</i>	3,38	5,22	4,60	56,99	68,83	63,07	5,31	36,49	15,59
<i>P. maximum</i>	4,59	7,28	5,71	36,16	73,63	59,78	3,67	49,12	24,74
<i>U. brizantha</i>	3,68	5,81	4,76	54,89	74,17	67,31	1,74	30,23	11,20
Camada de 0,20-0,30 m									
<i>U. humidicola</i>	3,28	4,37	4,06	21,55	60,53	48,21	17,43	68,38	34,46
<i>P. maximum</i>	3,72	5,65	4,45	21,93	57,14	35,28	19,09	65,06	52,64
<i>U. brizantha</i>	2,73	5,15	3,59	30,89	60,67	42,52	12,16	49,83	35,45

se observou maiores valores médios da saturação por bases (V%) e menores valores médios da saturação por alumínio (m) na camada de 0,00-0,10 m em relação as demais camadas.

A análise de componentes principais na camada de 0,00-0,10 m considerou os dois primeiros fatores, que tiveram autovalor acumulado de 56,6%. O primeiro componente principal resultou da combinação linear das 11 variáveis estudadas e explicou 34,9% da variância total, enquanto que o segundo componente 21,9% (Figura 1 A). Na camada de 0,10-0,20 m, os dois primeiros fatores tiveram autovalor acumulado de 59,6%. O primeiro componente principal resultou da combinação linear das 11 variáveis estudadas e explicou 34,3% da variância total, enquanto que o segundo componente 25,3% (Figura 1 B). Na camada de 0,20-0,30 m, os dois primeiros fatores tiveram autovalor acumulado de 64,9%. O primeiro componente principal resultou da combinação linear das 11 variáveis estudadas e explicou 41,7% da variância total, enquanto que o segundo componente 23,2% (Figura 1 C).

De maneira geral se observa que, em todas as camadas de solo avaliadas, o primeiro componente se correlaciona positivamente com as variáveis DR, VR, CR, DMR, teor de CO e V (Figura 1). Este componente pode ser interpretado como uma resposta relacionada, principalmente, ao desenvolvimento do sistema radicular das espécies, que por sua vez correlaciona-se negativamente com a RT e com a m.

A relação negativa do alumínio no desenvolvimento radicular das plantas já é conhecida, embora as *Urochloas* sejam espécies menos suscetíveis à presença deste elemento no solo, conforme visualizado na Tabela 3. Matins et al. (2011) e Miguel et al. (2011), avaliando efeitos de doses crescentes

de alumínio no desenvolvimento de *Urochloas* também observaram que o crescimento das raízes não foi afetado pelo aumento na concentração de alumínio.

A presença de alumínio nos solos construídos após a mineração de carvão pode ser consequência da presença de estereis, que podem conter pirita (Pinto & Kämpf, 2002) no perfil de solo recomposto. A pirita, por sua vez, ao entrar em contato com o oxigênio e a água provoca a drenagem ácida de mina, que acarreta a geração de elevada acidez e altas concentrações de Fe, Al e Mn na solução de solos construídos (Chen et al., 2013), com implicações negativas na revegetação da área degradada (Inda et al., 2010).

A correlação negativa entre CO e RT (Figura 1) está de acordo com os resultados observados em solos agrícolas (Ferreira et al., 2011; Tormena et al., 2008). A correlação negativa entre os atributos radiculares (DR, VR, CR e DMR) e a RT (Figura 1) pode estar relacionado ao sistema radicular agressivo e ao crescimento contínuo das espécies vegetais, conforme já observado em solos agrícolas por Guimarães et al. (2009).

O segundo componente da camada de 0,00-0,10 m, mostra que as variáveis V e DMR foram as que mais se correlacionaram negativamente com a saturação por alumínio (m) e o CR (Figura 1 A). Este resultado concorda com Brady & Weil (2013), que mencionam que os sintomas de fitotoxicidade das raízes em relação ao alumínio no solo são o seu engrossamento e encurtamento. Por outro lado, a correlação negativa entre DMR e m indica, possivelmente, um efeito indireto provocado pela compactação, adversidade física comum em solos construídos (Wick et al., 2009; Sheoran et al., 2010; Borůvka

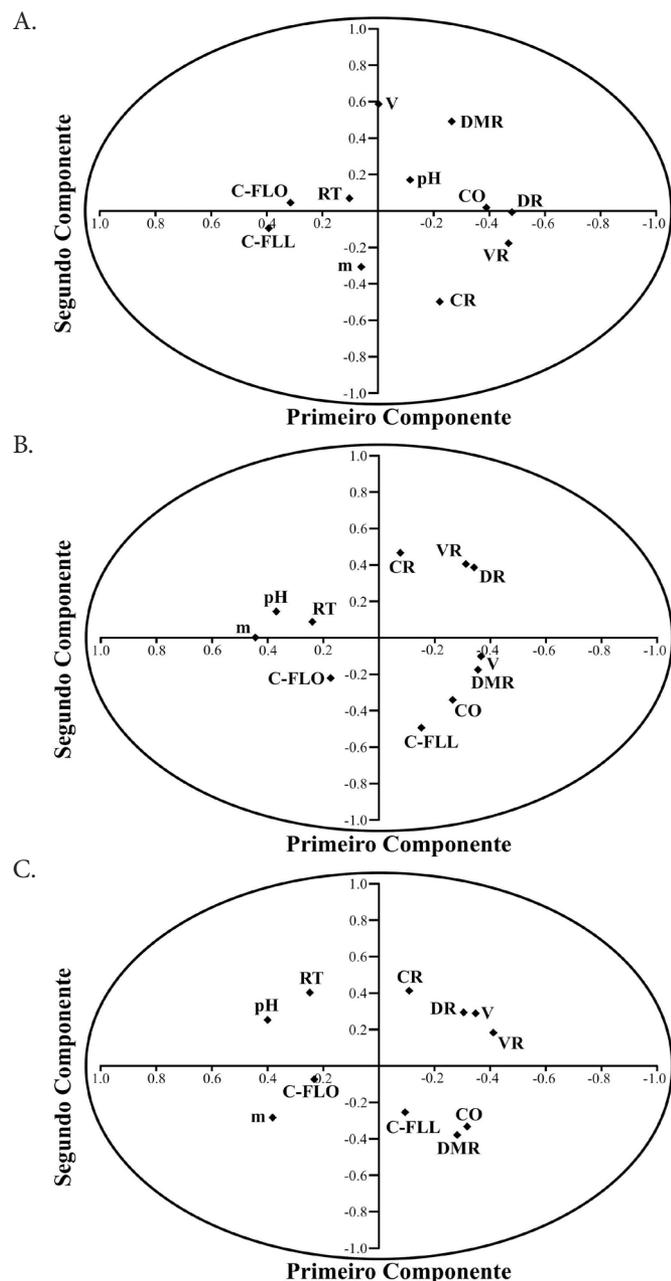


Figura 1. Autovetores das variáveis de desenvolvimento das raízes: DR (densidade radicular); VR (volume radicular); CR (comprimento radicular); DMR (diâmetro médio das raízes); RT (resistência tênsil de agregados); CO (carbono orgânico); C-FLL (carbono da fração leve livre); C-FLO (carbono da fração leve oclusa); V (saturação por bases) e saturação por alumínio (m) na camada de 0,00-0,10 m (A), de 0,10-0,20 m (B) e 0,20-0,30 m (C)

et al., 2012), o qual favorece a emissão de raízes mais finas para que as gramíneas possam seguir seu desenvolvimento. Isto faz sentido ao se analisar os baixos valores de m para cada tratamento na camada de 0,00-0,10 m (Tabela 5).

Nas camadas de 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m, o segundo componente apresentou correlações negativas mais expressivas entre os atributos radiculares DR, VR, CR e os atributos CO e C-FLL (Figura 1 B, C). Este resultado evidencia a influência dos estéreis localizados próximos à superfície do novo solo, conforme mostrado na Tabela 2. Este resultado difere do esperado, pois almejava-se verificar uma correlação positiva entre os atributos radiculares e os teores de CO e principalmente

do C-FLL. Todavia, o teor total de CO e principalmente as frações de C-FLL e C-FLO obtidos neste estudo não se referem apenas ao carbono oriundo dos resíduos vegetais das plantas utilizadas na revegetação, mas também àquele presente no horizonte B do solo original e do carbono litogênico presente nos fragmentos de carvão e de folhelhos carbonosos. Elevados teores de carbono em estéreis também foram observados por Bitencourt (2014). Todavia, segundo Dick et al. (2002), este carbono apresenta um caráter mais aromático e uma relação C/N mais baixa que o carbono observado em solos naturais, não podendo ser considerado, portanto, como um condicionador do solo.

A distribuição das gramíneas com base na ACP das variáveis de desenvolvimento das raízes e das variáveis químicas e física do solo nas camadas de 0,00-0,10m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m podem ser observadas na Figura 2.

Considerando os quadrantes formados pelo primeiro e segundo componentes (Figura 2 A), observa-se que na camada de 0,00-0,10 m, a *U. brizantha* apresenta os maiores valores de DMR e DR e o solo apresenta os maiores valores de V, pH e CO (Figura 1 A). A potencialidade desta gramínea em emitir mais raízes do que outras espécies concorda com Guenni et al. (2002) que também observaram que a *U. brizantha* apresentou a maior biomassa de raízes até a profundidade de 0,30 m quando comparada a outras espécies vegetais. Silva Filho et al. (2014), Amaral et al., (2012), Rezende et al. (2011) e Santos et al. (2007) também observaram que a *U. brizantha* tem sua biomassa radicular otimizada pela adubação, estocando, conseqüentemente, uma gama de nutrientes ao longo do perfil do solo. Os maiores valores de CO se devem à maior DR apresentada pela espécie (Tabelas 3 e 4). Segundo Baquero et al. (2012) e Izquierdo et al. (2005), a elevada concentração de raízes em determinada camada de solo tende a produzir maiores quantidades de carbono orgânico, devido à decomposição dos resíduos da parte aérea e raízes.

Nas áreas das espécies *U. humidicola* e *P. maximum* (Figura 2 A) as variáveis C-FLL e m foram as mais características (Figura 1 A e 2 A). Todavia, o *P. maximum* foi a espécie que apresentou a menor DR, VR, CR e DMR na camada de 0,00-0,10 m, conforme se observa na Tabela 3. Portanto, o maior C-FLL apresentado por esta espécie, assim como a maior m observado no solo sob seu cultivo (respectivamente Tabela 4 e 5), deve-se possivelmente à presença de pedaços de carvão contaminando a camada superficial do solo construído.

Nas camadas de 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m, os quadrantes formados pelo primeiro e segundo componentes (respectivamente Figura 2 B e 2 C), mostram que a *U. brizantha* apresentou os maiores valores de DMR e o solo apresentou maiores valores de CO e C-FLL (Figura 1 B e 1 C). O maior DMR desta espécie deve-se, possivelmente ao seu mecanismo de defesa frente à compactação das camadas subjacentes a 0,10 m, conforme relatado por Stumpf et al. (2014). Como nestas camadas, a *U. brizantha* apresentou um dos menores valores de DR, VR e CR (Tabela 3), o teor de CO e C-FLL deve-se à presença de rejeito em amostras de solo, conforme se observa na Tabela 2.

A espécie *U. humidicola* se caracterizou por ser a planta com maior desenvolvimento do CR, DR e VR (Figura 1 B

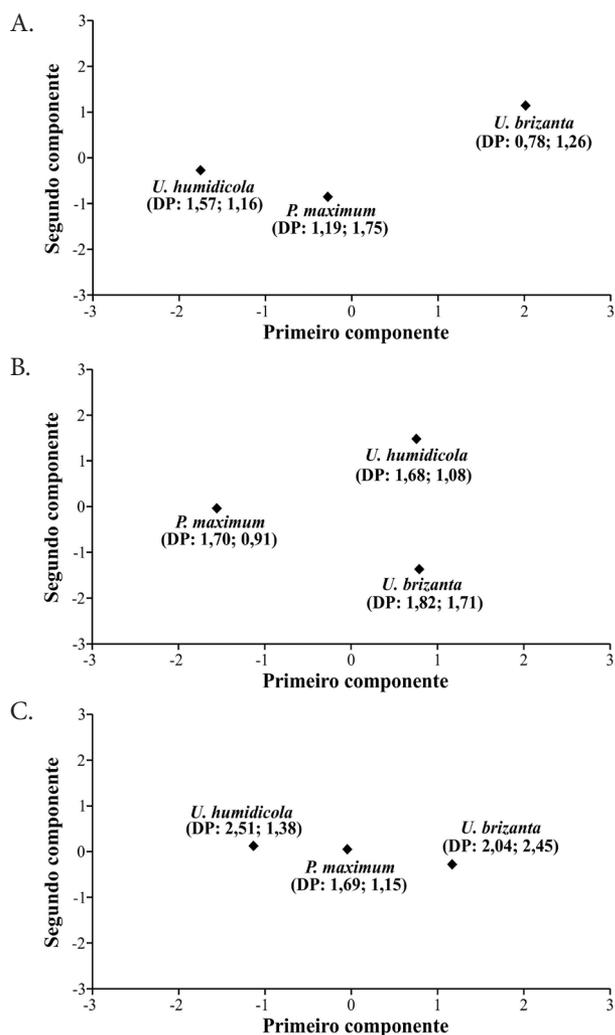


Figura 2. Agrupamento das gramíneas onde o DP representa o desvio padrão para o primeiro e para o segundo componente, respectivamente, nas camadas de 0,00-0,10m (A), 0,10-0,20m (B) e 0,20-0,30 m (C)

e 2 B) na camada de 0,10-0,20 m (Tabela 3). A espécie *P. maximum*, por sua vez, encontra-se no quadrante caracterizado por maiores valores de m, o que pode ter contribuído com o menor desenvolvimento radicular dessa espécie (Figura 1 B e 2 B), confirmada pela Tabela 3 e 5.

Na camada de 0,20-0,30 m as espécies *U. humidicola* e *P. maximum* foram agrupadas no mesmo quadrante (Figura 2 C), caracterizada pela alta correlação com a variável m (Figura 1 C), ocasionada pela presença de rejeito em amostras de solo (Tabela 2).

Conclusões

A resistência tênsil de agregados pode ser considerada um indicador da qualidade de solos minerados em processo de recuperação, pois a maior concentração de raízes das gramíneas na camada superficial pode estar influenciando na sua reestruturação física.

Os teores de carbono das frações leve livre e leve oclusa não se mostraram indicadores adequados para avaliar a recuperação de áreas degradadas pela mineração de carvão em face das correlações negativas com os atributos radiculares,

devido ao carbono presente no horizonte B do solo original e nos estéreis.

A *Urochloa brizantha* é a espécie que mostrou maior potencialidade em desenvolver suas raízes na camada superficial de solos minerados.

Agradecimentos

À Companhia Riograndense de Mineração (CRM), CNPQ-Rede do Carvão, CAPES e CNPq pelo apoio e financiamento do estudo.

Literatura Citada

- Abdollahi, L.; Schjønning, P.; Elmholt, S.; Munkholm, L.J. The effects of organic matter application and intensive tillage and traffic on soil structure formation and stability. *Soil & Tillage Research*, v.136, p.28-37, 2014. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2013.09.011>>.
- Abid, M.; Lal, R. Tillage and drainage impact on soil quality: II. Tensile strength of aggregates, moisture retention and water infiltration. *Soil & Tillage Research*, v.103, n.2, p.364-372, 2009. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2008.11.004>>.
- Amaral, C.S.; Barros Silva, E.; Amaral, W.G.; Nardis, B.O. Crescimento de *Brachiaria brizantha* pela adubação mineral e orgânica em rejeito estéril da mineração de quartzito. *Bioscience Journal*, v.28, n.1, p.130-141, 2012. <<http://www.seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/13250/8357>>. 05 Jan. 2016.
- Baquero, J.E.; Ralisch, R.; Medina, C.C.; Tavares Filho, J.; Guimarães, M.F. Soil physical properties sand sugarcane root growth in a Red Oxisol. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.36, n.1, p.63-70, 2012. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832012000100007>>.
- Bavoso, M.A.; Giarola, N.F.B.; Tormena, C.A.; Pauletti, V. Preparo do solo em áreas de produção de grãos, silagem e pastejo: efeito na resistência tênsil e friabilidade de agregados. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.34, n.1, p.227-234, 2010. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832010000100023>>.
- Bitencourt, D.G.B. Dinâmica de acidificação e metais no solo e subsolo de solos construídos na área de mineração de carvão de Candiota-RS. Pelotas: Universidade Federal de Pelotas, 2014. 125p. Tese Doutorado.
- Böhm, W. Methods of studying root systems. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 1979. 188 p. (Ecological Studies, 33).
- Borůvka, L.; Kozák, J.; Mühlhanslová, M.; Donátová, H.; Nikodem, A.; Němeček, K. Effect of covering with natural topsoil as a reclamation measure on brown-coal mining dumpsites. *Journal of Geochemical Exploration*, v.113, p.118-123, 2012. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.11.004>>.
- Brady, N.C.; Weill, R. Elementos da natureza e propriedades dos solos. Porto Alegre: Bookman Editora, 2013. 685p.
- Chen, L.; Tian, Y.; Stehouwer, R.; Kost, D.; Guo, X.; Bigham, J.M.; Beeghly, J.; Dick, W.A. Surface coal mine land reclamation using a dry flue gas desulfurization product: Long-term biological response. *Fuel*, v.105, p.258-265, 2013. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2012.06.081>>.

- Conceição, P.C.; Boeni, M.; Dieckow, J.; Bayer, C.; Mielniczuk, J. Fracionamento densimétrico com politungstato de sódio no estudo da proteção física da matéria orgânica em solos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.32, n.2, p.541-549, 2008. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000200009>>.
- Debiasi, H.; Levien, R.; Trein, C.R.; Conte, O.; Mazurana, M. Capacidade de suporte e compressibilidade de um Argissolo influenciadas pelo tráfego e por plantas de cobertura de inverno. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.32, n. spe, p.2629-2637, 2008. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000700004>>.
- Dexter, A.R.; Kroesbergen, B. Methodology for determination of tensile strength of soil aggregates. *Journal of Agricultural Engineering Research*, v.31, n.2, p.139-147, 1985. <[http://dx.doi.org/10.1016/0021-8634\(85\)90066-6](http://dx.doi.org/10.1016/0021-8634(85)90066-6)>.
- Dick, D.P.; Mangrich, A.S.; Meneses, S.M.C.; Pereira, B.F. Chemical and spectroscopical characterization of humic acids from two south Brazilian coals of different ranks. *Journal Brazilian Chemical Society*, v.13, n.2, p.177-182, 2002. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-50532002000200008>>.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa. Manual de Métodos de análise de solo. Rio de Janeiro: Embrapa; Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 2011. 230p.
- Ferreira, A.D.O.; Sá, J.C.D.M.; Giarola, N.F.B.; Harms, M.G.; Miara, S.; Bavoso, M.A.; Netto, C.Q. Variação na resistência tênsil de agregados em função do conteúdo de carbono em dois solos na região dos Campos Gerais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.35, n.2, p.437-445, 2011. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832011000200013>>.
- Ferreira, D.F. Estatística multivariada. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2008. 662p.
- Frazão, L.A.; Santana, I.K.D.S.; Campos, D.V.B.D.; Feigl, B.J.; Cerri, C.C. Estoques de carbono e nitrogênio e fração leve da matéria orgânica em Neossolo Quartzarênico sob uso agrícola. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.45, n.10, p.1198-1204, 2010. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2010001000020>>.
- Guenni, O.; Marin, D.; Baruch, Z. Responses to drought of five *Brachiaria* species. I. Biomass production, leaf growth, root distribution, water use and forage quality. *Plant & Soil*, v.243, n.2, p.229-241, 2002. <<http://dx.doi.org/10.1023/A:1019956719475>>.
- Guimarães, R.M.L.; Tormena, C.A.; Alves, S.J.; Fidalski, J.; Blainski, E. Tensile strength, friability and organic carbon in an Oxisol under a crop-livestock system. *Scientia Agricola*, v.66, n.4, p.499-505, 2009. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90162009000400011>>.
- Ibarra, S.Y.; Mckyes, E.; Broughton, R.S. Measurement of tensile strength of unsaturated sandy loam soil. *Soil & Tillage Research*, v.81, n.1, p.15-23, 2005. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2004.04.002>>.
- Imhoff, S.; Silva, A.P.; Dexter, A. Factors contributing to the tensile strength and friability of Oxisols. *Soil Science Society American Journal*, v.66, n.5, p.1656-1661, 2002. <<http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2002.1656>>.
- Inda, A.V.; Quinõnes, O.R.G.; Giassoni, E.; Bissani, C.A.; Dick, D.P.; Nascimento, P.C. Atributos químicos relacionados ao processo de sulfurização em solos construídos após mineração de carvão. *Ciência Rural*, v.40, n.5, p.1060-1067, 2010. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782010000500010>>.
- Izquierdo, I.; Caravaca, F.; Alguacil, M.M.; Hernandez, G.; Roldan, A. Use of microbiological indicators for evaluating success in soil restoration after revegetation of a mining area under subtropical conditions. *Applied Soil Ecology*, v.30, n.1, p.3-10, 2005. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apsoil.2005.02.004>>.
- Lima, V.M.P.; Oliveira, G.C.; Serafim, N.E.; Curi, N.; Evangelista, A.R. Intervalo hídrico ótimo como indicador de melhoria da qualidade estrutural de Latossolo degradado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.36, n.1, p.71-78, 2012. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832012000100008>>.
- Lunardi Neto, A.L.; Albuquerque, J.A.; Almeida, J.A.; Mafra, A.L.; Medeiros, J.C.; Alberton, A. Atributos físicos do solo em área de mineração de carvão influenciados pela correção da acidez, adubação orgânica e revegetação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.32, n.4, p.1379-1388, 2008. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000400002>>.
- Maharana, J.K.; Patel, A.K. Characterization of physico-chemical properties and their impact on enzyme activities in a chronosequence coal mine overburden spoil as biomarker for reclamation process. *Bacteriology and Parasitology*, v.4, n.4, p.174-183, 2013. <<http://dx.doi.org/10.4172/2155-9597.1000174>>.
- Matins, C.E.; Miguel, P.S.B.; Rocha, W.S.D.D.; Sobrinho, F.S.; Gomes, F.T.; Oliveira, A.V.D. Seleção de genótipos de *Brachiaria ruziziensis* quanto à tolerância ao alumínio em solução nutritiva: I: Resposta a diferentes concentrações de alumínio e valores de ph em solução nutritiva. *Revista de Ciências Agrárias*, v.34, n.1, p.154-162, 2011. <http://www.scielo.mec.pt/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0871-018X2011000100014>. 07 Jan. 2016.
- Miguel, P.S.B.; Rocha, W.S.D.; Sobrinho, F.S.; Martins, C.E.; Gomes, F.T.; Oliveira, A.V.; Carvalho, C.A. Seleção de genótipos de *Brachiaria ruziziensis* quanto ao alumínio em solução nutritiva: II: Avaliação da tolerância ao alumínio. *Revista de Ciências Agrárias*, v.34, n. 1, p.163-172, 2011. <http://www.scielo.mec.pt/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0871-018X2011000100015>.
- Mukhopadhyay, S.; Maiti, S.K.; Mastro, R.E. Use of Reclaimed Mine Soil Index (RMSI) for screening of tree species for reclamation of coal mine degraded land. *Ecological Engineering*, v.57, p.133-142, 2013. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.04.017>>.
- Mukhopadhyay, S.; Maiti, S.K.; Mastro, R.E. Development of mine soil quality index (MSQI) for evaluation of reclamation success: A chronosequence study. *Ecological Engineering*, v.71, p.10-20, 2014. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.07.001>>.
- Pillon, C.N.; Mielniczuk, J.; Ladislau, M.N. Métodos de fracionamento e caracterização da matéria orgânica do solo. Pelotas: Embrapa Clima Temperado. 2002. 50 p. (Embrapa Clima Temperado. Documentos, 106).

- Pillon, C.N.; Santos, D.C.D.; Lima, C.L.R.D.; Antunes, L.O. Carbono e nitrogênio de um Argissolo Vermelho sob floresta, pastagem e mata nativa. *Ciência Rural*, v.41, n.3, p.447-453, 2011. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782011000300013>>.
- Pinto, L.F.S.; Kämpf, N. Contaminação dos solos construídos. In: Teixeira, E.C.; Pires, M.J.R. (Orgs.). *Meio ambiente e carvão: Impactos da exploração e utilização*. Porto Alegre: FINEP/CAPES/PADCT/GTM/PUCRS/UFSM/FEPAN, 2002. p.69-92.
- Portugal, A.F.; Jucksch, I.; Schaefer, C.E.G.; Wendling, B. Determinação de estoques totais de carbono e nitrogênio e suas frações em sistemas agrícolas implantados em Argissolo vermelho-amarelo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.32, n.5, p.2091-2100, 2008. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000500030>>.
- Rezende, A.V.; Lima, J.F.; Rabelo, C.H.S.; Rabêlo, F.H.S.; Nogueira, D.A.; Carvalho, M.; Faria Júnior, D.C.N.A.; Barbosa, L.A. Características morfofisiológicas da *Brachiaria brizantha* cv. Marandu em resposta à adubação fosfatada. *Agrarian*, v.4, n.14, p.335-343, 2011. <<http://www.periodicos.ufgd.edu.br/index.php/agrarian/article/view>>. 15 Jan. 2016.
- Rodrigues, G.B.; Maltoni, K.L.; Cassiolato, A.M.R. Dinâmica da regeneração do subsolo de áreas degradadas dentro do bioma Cerrado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.11, n.1, p.73-80, 2007. <<http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662007000100010>>.
- Roscoe, P.; Buurman, P. Tillage effects on soil organic matter in density fractions of a Cerrado Oxisol. *Soil & Tillage Research*, v.70, n.2, p.107-119, 2003. <[http://dx.doi.org/10.1016/S0167-1987\(02\)00160-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-1987(02)00160-5)>.
- Santos, D.C.; Oliveira Farias, M.; Lima, C.L.R.; Kunde, R.J.; Pillon, C.N.; Flores, C.A. Fracionamento químico e físico da matéria orgânica de um Argissolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso. *Ciência Rural*, v.43, n.5, p.838-844, 2013. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782013005000037>>.
- Santos, R.S.M.; Oliveira, I.P.; Morais, R.F.; Urquiaga, S.C.; Boddey, R.M.; Alves, B.J.R. Componentes da parte aérea e raízes de pastagens de *Brachiaria* spp. em diferentes idades após a reforma, como indicadores de produtividade em ambiente de Cerrado. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v.37, n.2, p.119-124, 2007. <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=253020281009>>. 12 Jan. 2016.
- Statistical Analysis System - SAS. User's Guide. 5.ed. Cary: SAS Institute Inc., 1985.
- Sena, K.; Barton, C.; Hall, S.; Angel, P.; Agouridis, C.; Warner, R. Influence of spoil type on afforestation success and natural vegetative recolonization on a surface coal mine in Appalachia, United States. *Restoration Ecology*, v.23, n.2, p.131-138, 2014. <<http://dx.doi.org/10.1111/rec.12164>>.
- Sheoran, V.; Sheoran, A.S.; Poonia, P. Soil reclamation of abandoned mine land by revegetation: a review. *International Journal of Soil, Sediment and Water*, v.3, n.2, p.2-13, 2010. <<http://scholarworks.umass.edu/intljssw/vol3/iss2/13>>. 15 Jan. 2016.
- Silva Filho, A.S.; Mousquer, C.J.; de Castro, W.J.R.; de Siqueira, J.V.M.; de Oliveira, V.J.; Machado, R.J.T. Desenvolvimento de *Brachiaria brizantha* cv. marandu submetido a diferentes doses de ureia. *Revista Brasileira de Higiene e Sanidade Animal*, v.8, n.1, p.172-188, 2014. <<http://dx.doi.org/10.5935/1981-2965.20140012>>.
- Sourkova, M.; Frouz, J.; Fettweis, U.; Bens, O.; Huttli, Santruckova, H. Soil development and properties of microbial biomass succession in reclaimed post mining sites near Sokolov (Czech Republic) and near Cottbus (Germany). *Geoderma*, v.129, n.1-2, p.73-80, 2005. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.12.032>>.
- Stumpf, L.; Pauletto, E.A.; Fernandes, F.F.; Suzuki, L.E.A.S.; Silva, T.S.; Pinto, L.F.S.; Lima, C.L.R. Perennial grasses for recovery of the aggregation capacity of a reconstructed soil in a coal mining area in southern Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.38, n.1, p.327-335, 2014. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832014000100033>>.
- Tedesco, M.J.; Gianello, C.; Bissani, C.A.; Bohnen, H.; Volkweiss, S.J. Análise de solo, plantas e outros materiais. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p.
- Tormena, C.A.; Araújo, M.A.; Fidalski, J.; Imhoff, S.; Silva, A.P. Quantificação da resistência tênsil e da friabilidade de um Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.32, n.3, p.943-952, 2008. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000300004>>.
- Ussiri, D.A.N.; Lal, R.; Jacinthe, P.A. Soil properties and carbon sequestration of afforested pastures in reclaimed minesoils of Ohio. *Soil Science Society of America Journal*, v.70, n.5, p.1797-1806, 2006. <<http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2005.0352>>.
- Wick, A.F.; Ingram, L.J.; Stahl, P.D. Aggregate and organic matter dynamics in reclaimed soils as indicated by stable carbon isotopes. *Soil Biology & Biochemistry*, v.41, n.2, p.201-209, 2009. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.09.012>>.
- Yada, M.M.; Mingotte, F.L.C.; Melo, W.J.; Melo, G.P.; Melo, V.P.; Longo, R.M.; Ribeiro, A.Í. Atributos químicos e bioquímicos em solos degradados por mineração de estanho e em fase de recuperação em ecossistema amazônico. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.39, n.3, p.714-724, 2015. <<http://dx.doi.org/10.1590/01000683rbc20140499>>.
- Zhang, L.; Jinmanwang, W.; Bai, Z.; Chunjuan, LV. Effects of vegetation on runoff and soil erosion on reclaimed land in an opencast coal -mine dump in a loess area. *Catena*, v.128, p.44-53, 2015. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2015.01.016>>.